干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2018.05.19

宁夏中部干旱带盐池县植被生态需水规律研究①

李金燕[1,2,3]

(1 宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021; 2 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心,宁夏 银川 750021; 3 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心,宁夏 银川 750021)

摘 要: 以宁夏中部干旱带盐池县为研究对象,对区域植被生态需水的内涵及类型划分进行了分析,并结合彭曼—蒙特斯模型逐月估算了区域林草植被潜在蒸散量,采用 Jensen 公式结合实测的区域土壤特征曲线确定了土壤水分修正系数,为植被生态需水量的确定奠定了基础。通过对不同类型林草植被生态需水占比分析,可知当前盐池县草地的生态需水量远高于林地,是盐池县生态需水的主体。通过对植被生态需水与降雨平衡的时间变化规律分析可知,除 7、8、9 月份以外,盐池县各类林草植被生态需水均处于严重亏缺状态,其中缺水量最为严重的是 4 月份;从植被类型上分析,可知林地中无论是生态需水亏缺量还是盈余水量均以灌木林地为最,而草地中以天然草地为最。进一步对盐池县各生态分区需水特征进行分析,可知一级生态分区中,风沙区的生态需水比例远大于黄土丘陵区;二级生态分区生态需水比例由大到小依次为花马池镇、王乐井乡、大水坑镇、高沙窝镇、惠安堡镇、冯记沟乡、青山乡、麻黄山乡。一级生态分区中风沙区的生态需水系数及生态需水模数均大于黄土丘陵区;二级各生态分区中生态需水系数及模数由大到小依次为花马池镇、王乐井乡、大水坑镇、惠安堡镇、高沙窝镇、青山乡、冯记沟乡,最小为麻黄山乡。盐池县降雨消耗性生态需水量最小值占蒸发总量的比例为 30.51%,适宜值占蒸发总量的比例为 72.91%,比例都比较高,其余的的蒸发量属于无效蒸发水量,仍然占有一定的比重,这依然为区域植被建设留有一定的空间,但要通过合理的水资源调控手段进行调配。

关 键 词: 宁夏盐池县;植被生态需水占比;降水资源平衡;生态需水

中图分类号: X171;Q948 **文献标识码:** A **文章编号:**

面对西北干旱区日益严重的生态环境恶化问题,生态环境需水研究已成为协调生产、生活与生态环境之间的用水关系、实现水资源的合理开发利用、保护和改善生态与环境首要考虑的问题,也逐渐成为生态学和水科学领域研究的热点问题。植被是生态系统生物部分中最基本的组成成分,尤其是森林生态系统具有良好的结构和功能,在生态环境建设中发挥着不可替代的作用,因此合理发展和控制林草植被面积对于指导区域生态的恢复与重建具有重要意义,其生态需水的研究也就越来越受到人们的关注。

盐池县位于宁夏回族自治区东部(106°30′~107°41′E,37°04′~38°10′N),总面积 6 620 km^2。北与毛乌素沙地相连,南接黄土高原;处于半干旱向干旱区,草原向荒漠区,农区向牧区的过渡地带,这种地理位置上的过渡性决定了盐池县自然条件资源的多样性和脆弱性的特征。由于人为的破坏,区域内水土流失严重,为黄土高原严重水土流失区之一。在国家实施西部大开发的战略背景下,盐池县以林草植被生态建设为主,有效扩大林草面积,尝试通过林草植被建设来控制区域水土流失,改善生态环境。长期以来,盐池县虽然在生态建设方面进行了不懈的努力,但全县土地沙化趋势没有得到有效控制,影响和制约当地经济发展和社会进步。开展盐池县林草植被生态需水的研究,将有助于对水资源利用以及区域水文过程形成新的认识,从而更好地为该地区水资源综合利用以及改善提供决策,促进该地区社会经济的可持续发展[1-2]。

① **收稿日期:** 2018-03-22; **修订日期:** 2018-05-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(51569024)资助;宁夏高等学校一流学科建设(水利工程 NXYLXK2017A03)资助
作者简介: 李金燕(1976-),女,汉族,宁夏平罗人,博士,教授,研究方向为旱区水环境与水土资源调控. E-mail:lijinyan001@163.com

1 盐池县林草植被生态需水内涵及类型划分

众多研究表明植被生态需水研究的关键是植被蒸散量的确定。蒸散量的大小受植物本身生理特点、生长状况以及气候特征等多种因素的影响,使其研究变得异常复杂。关于植被蒸散量也随之出现了三种表达形式,即潜在蒸散量、最大蒸散量和实际蒸散量。潜在蒸散量是大气蒸散能力的度量,表明了某种气候条件下植被可能的蒸散能力,该值只与区域气象因素有关;最大蒸散量是指植物在适宜生长条件下,最大限度地发挥生长潜力的蒸散量,该值不仅与植物生态特征、生长状况有关,同时也与气象因素有关。实际蒸散量是在实际的土壤含水条件下植被的蒸散量,此值与植物生长状况、大气环境条件以及土壤水分条件三个方面的因素有关[3]。通过以上分析,本研究认为干旱半干旱地区由于受降水条件的限制,田间土壤在通常情况下处于缺水状态,这种缺水条件下的蒸散量就是植被的实际蒸散量,可视作植被的生态环境需水定额来开展进一步的研究。

土地利用分布图中将林地分为4类,即有林地、灌木林地、疏林地和未成林地。有林地是指郁闭度大于30%的天然林和人工林;疏林地是指郁闭度在10% ~30%的稀疏林地;灌木林地是指覆盖度在30%以上、高度在2 m以下的矮林地和灌丛林地。草地类型有天然草地、多年生人工草地、一年生人工草地。考虑到这各类林地及草地在群落结构和外貌特征等方面存在着很大的差异,势必会造成各自生态环境需水微观及宏观上的不同,须对其生态环境需水量分类进行估算和分析[4-5]。本研究中林、草植被面积及类型来源于《宁夏回族自治区盐池县林地、草地面积结构统计》(2014年)。据统计盐池县灌木林地中人工林占70%以上,有林地、疏林地和未成林地全部为人工林。盐池县林、草植被覆盖面积统计见表1。

表1 盐池县林、草覆盖面积统计表 / km^2

Tab. 1 Existing forestland and grassland coverage statistics / km^2

植被类型	植被面积				
林地	有林地	疏林地	灌木林	未成林地	苗圃
	67.56	11.15	1 021.09	317.19	1.22
草地	天然草地	人工草地			
		一年生		多年生	
	4 774.72	144.44		288.89	

2 生态分区

2.1 分区原则和方法

(1)生态分区在空间上要能反映生态系统要素与水资源之间的关系;(2)生态分区在水资源管理上要与以水系、流域为单元的原则相符合;(3)生态分区要与水土保持和生态环境建设分区方案相结合;(4)生态分区要遵循便于按行政区域对生态环境需水进行配置、管理的原则;(5)生态分区要保留所有与生态相关的原有的划分界线。

2.2 分区依据

按照上述原则,分区依据包括研究区行政区划资料、土地利用资料、森林分布及保护规划资料等。主要有:宁夏回族自治区盐池县林地保护利用规划(2010—2020年);盐池县生态文明示范工程试点规划(2011—2015年);盐池县生态环境建设"十二五"规划。

(1)以区域自然地理为背景的一级生态区

一级生态分区通常以区域自然地理环境因素作为主导因素来反映地带的差异,一般来讲气候和地貌是表征区域自然地理环境差异的两个代表性因素。而研究区内气候因素差异相对较小,因此不作为生态分区的主导因素,将地貌类型作为分区的主导因素。根据盐池县的地貌类型,一级生态区可分为中北部的风沙区和南部的黄土丘陵区。

(2)以乡域为依据的二级生态分区

为了分析地区间生态环境需水量差异,且有利于指导生态环境建设,并将生态环境需水与水资源管理有机结合起来,二级分区以乡域行政区划为依据划分,据此盐池县二级生态分区为县域内的8个乡镇。

3 植被生态需水量估算

3.1 潜在蒸散量的估算

参考作者研究成果[6-8],通过对几种植被潜在蒸散量估算方法的比较,认为彭曼—蒙特斯法综合考虑了各类气象因素以及地理位置因素,该方法用于计算植被潜在蒸散量结果更具真实可靠性,因此采用彭曼—蒙特斯模型作为本次植被潜在蒸散量的计算依据。模型表达式为:

$$ET_O = \frac{0.408\times\Delta\times(R_n - G) + \gamma\times\frac{900}{T+273}\times u_2\times VPD}{\Delta+\gamma\times(1+0.34\times u_2)} \quad (1)$$

式中：ET_O 为参考作物潜在蒸散量（mm · d^{-1}）；Δ 为饱和水汽压 e_a 与温度曲线的斜率（kPa · ℃$^{-1}$）；R_n 为作物表面的净辐射量；G 为土壤热通量（MJ · m^{-2} · d^{-1}）；γ 为干湿表常数（kPa · ℃$^{-1}$）；T 为平均日或月气温（℃）；u_2 为 2 m 处的平均风速（m · s^{-1}）；VPD 为 2 m 高出水汽压亏缺量，$VPD = e_a - e_d$，e_a 和 e_d 分别为饱和、实际水汽压。

中国水利水电科学研究院结合彭曼—蒙特斯模型研发的“省灌溉用水有效利用系数测算分析管理系统”软件用于估算植被潜在蒸散量方便有效。通过输入区域或流域气象站点地理位置（经度、纬度、高程）、多年平均降雨量、日最低气温、日最高气温、日照时数、日平均相对湿度、2 m 处风速、日降雨量 6 项水文气象参数，即可得出区域植被逐日潜在蒸散量 ET_{0j}，进而通过累加逐日计算值可得到旬、月或年 ET_0 值。以研究区域 2014 年典型平水年份盐池县区逐日气象参数计算区域植被潜在蒸散量，进而累加得到逐月结果见表 2。

3.2 植被生态需水量估算

众所周知，植物的生存需要从土壤中汲取水分，因此，可以通过土壤水分的动态变化来将土壤对植物生长的影响表现出来。在土壤水分状况和林木生长都处于理想状态时，林地的蒸散量可以达到由气候条件决定的潜在蒸散力，也就是最大蒸散能力。但是黄土丘陵区和风沙区的实际情况是林木生长和土壤水分含量在绝大多数情况下通常都处于非理想状态。所以，在计算林地实际需水量时，除了考虑不同植被类型的差异和生长状况、区域气候条件外，同时还必须考虑到土壤水分的供给情况，这样就产生了实际蒸散量的概念。在实际计算中，以植被需水系数 K_c 来体现植被类型的差异，以土壤水分修正系数 K_s 来体现不同土壤水分条件对林地实际蒸散的影响情况。因此，植被实际蒸散量，也就是植被生态需水定额通常采用下式估算[6-8]：

$$ET_{Ci} = ET_{0i}\times K_c\times K_s \quad (2)$$

式中：ET_{Ci} 为计算时段内 i 种类型植被实际生态需水定额（mm）；ET_{0i} 为计算时段内 i 种类型植被潜在蒸散量（mm）；K_c 为相应时段植被需水系数；K_s 为相应区域的土壤水分修正系数。

由上式可见，在植被潜在蒸散量估算的基础上，确定实际需水定额的关键是植被需水系数及土壤水分修正系数。

3.2.1 植被需水系数的确定 本研究中林地面积及类型来源于《宁夏回族自治区盐池县林地面积结构统计》（2014 年），在该统计中将林地类型分为有林地、疏林地、灌木林地、苗圃类林地和未成林地。考虑到各类林草植被在群落结构和外貌特征等方面存在着很大的差异，势必会造成各自生态需水微观及宏观上的不同，因此本研究对研究区域几类林地分类统计分析。参考有关学者及作者关于林地生态需水定额研究成果[4-8]，取有林地的需水系数为 0.76，灌木林需水系数取值 0.61，而疏林地需水系数取值 0.48，而未成林地则受人为因子影响较多，所以在本研究中将其按疏林地的生态需水定额来统计，取值 0.48，苗圃类林地需水系数按灌木林地的需水标准取值，取值 0.61，草地需水系数取值 0.50。

3.2.2 植被土壤水分修正系数的确定 土壤水分修正系数是土壤实际水分条件对潜在蒸散的影响函数，它的涵义是指不同土壤类型在土壤水分供应不充足的情况下，林地实际蒸散量的变化。该值大小与土壤类型及土壤含水量相关。该值采用 Jensen 公式确定[9]，如式（3）所示：

$$K_s = \ln\left[\left(\frac{W - W_f}{W_c - W_f}\times 100\right)+1\right]/\ln 101 \quad (3)$$

式中：W 为土壤实际含水量；W_f 为土壤永久凋萎含水量；W_c 为土壤临界含水量。

由公式（3）可以看出，只要确定了相应土壤类型下植物各生长状态下的土壤含水量，就可以确定其土壤水分修正系数 K_s，也就可以结合植被需水系数及潜在蒸散量计算植被生态需水定额。

在黄土丘陵区，土壤含水量与林木生长状况关系的研究是生态学领域研究的热点问题，目前该领

表 2 植被逐月潜在蒸散量计算表 / mm

Tab. 2 Monthly vegetation potential evaporation calculation / mm

县区	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
盐池县	21.82	35.73	87.92	111.14	150.91	161.75	160.85	136.45	93.08	70.48	39.76	34.24	1 116.38

域已经有众多的研究成果。根据王孟本等[10]在晋西黄土高原地区刺槐林地对土壤基质水势和林木生长状况的研究成果,表明土壤基质水势为 -15×10^5 Pa 时的土壤含水量为植被的永久凋萎点(W_f);当植被土壤基质水势为 -0.3×10^5 Pa 时,此时的土壤含水量是林地土壤水分变化的一个关键点,因而,通常将土壤基质水势为 -0.3×10^5 Pa 时的土壤含水量作为黄土丘陵区植被的临界土壤含水量(W_c)。同时,研究也表明在黄土丘陵区植被的暂时凋萎点土壤基质水势的数值可达 -10×10^5 Pa 以下,因此,通常将 -10×10^5 Pa 作为黄土丘陵区植被生长的暂时凋萎水势,此时的土壤含水量为暂时凋萎含水量(W_t),对应土壤水分修正系数的适宜值。另有对黄土高原地区土壤水分的研究结果表明,在黄土丘陵区土壤基质水势为 -1×10^5 Pa 时的土壤含水量为保证植被正常生长的最低含水量,即生长阻滞含水量(W_r)对应土壤水分修正系数的最小值。据此,本研究首先实测盐池县以黄土丘陵区为代表的土壤水分特征曲线(图 1)。

根据实测的盐池县黄土丘陵区土壤水分特征曲线得到特定基质水势下的土壤特征参数,如表 3,进而代入公式(3)得黄土丘陵区土壤水分修正系数,如表 3 所示。

风沙区土壤水分修正系数略高于黄土丘陵区,其值确定过程同上。确定出各项修正系数后,根据

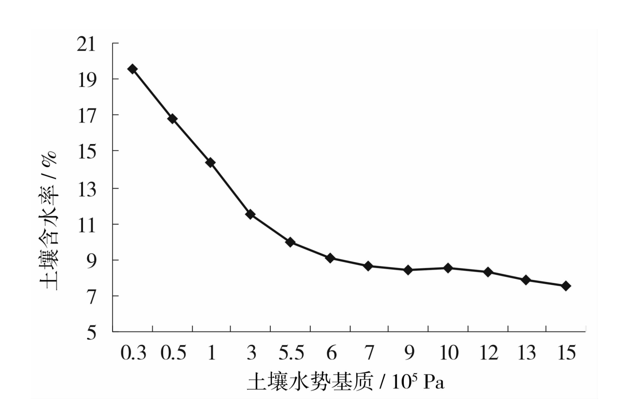


图 1 盐池县黄土丘陵区土壤水分特征曲线

Fig. 1 Existing moisture retention curve in loess hilly region

表 3 黄土丘陵区一定基质水势下土壤水分特征参数

Tab. 3 Soil moisture characteristic parameters under a certain matrix water potential in loess hilly region

土壤水分常数	W_f	W_t	W_r	W_c
土壤含水率	7.58	8.56	14.4	18.16
土壤基质水势	-15×10^5	-10×10^5	-1.0×10^5	-0.3×10^5

表 4 黄土丘陵区土壤水分修正值

Tab. 4 Revised value of soil moisture in loess hilly region

K_s	K_{st}	K_{sr}
值	0.48	0.87

公式(3)计算各类林草植被的相应的生态需水定额适宜值和最小值,则对应的生态需水量采用下式计算:

$$E_i = ET_{Ci}\times A_i \tag{4}$$

式中:E_i 为计算时段内 i 种类型植被生态需水量(10^4 m^3);ET_{Ci}为计算时段内 i 种类型植被实际生态需水定额(mm);A_i 为 i 种类型植被面积(km^2)。

4 结果与讨论

4.1 不同类型林草植被生态需水占比分析

由图 2、图 3 可见,当前盐池县草地的生态需水量远高于林地,可见草地是盐池县植被生态需水的主体,其中尤其是天然草地生态需水的占比非常之大。在三类林地生态需水中,灌木林地生态需水所占比例最大,其次是有林地和疏林地。由表 1 的林地面积统计数据可知盐池县灌木林地的面积占全部林地面积的 71.99%,可见灌木林地生态需水量大的主要原因是林地分布面积广;灌木林地中 85% 属人工林地,而有林地、疏林地全部为人工栽植。草地中生态需水量由大到小依次为天然草地、多年生人工草地、一年生人工草地,而各类草地面积由大到小也依次为天然草地、多年生人工草地、一年生人工草地。可见造成各类植被生态需水差异的主要原因是各自分布面积的差异所引起的。下文中将进一步通

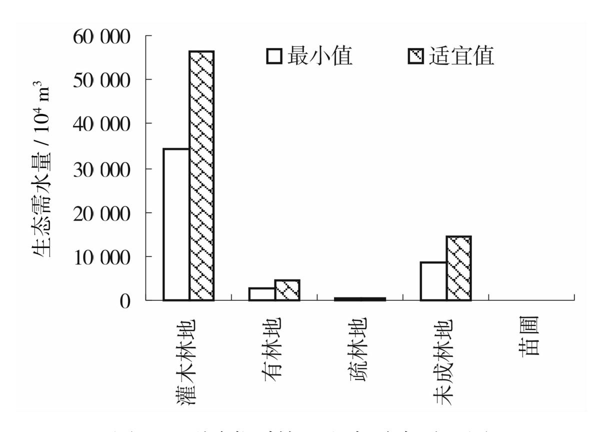


图 2 不同类别林地生态需水对比图

Fig. 2 Comparison of ecological water requirement for different categories of woodland

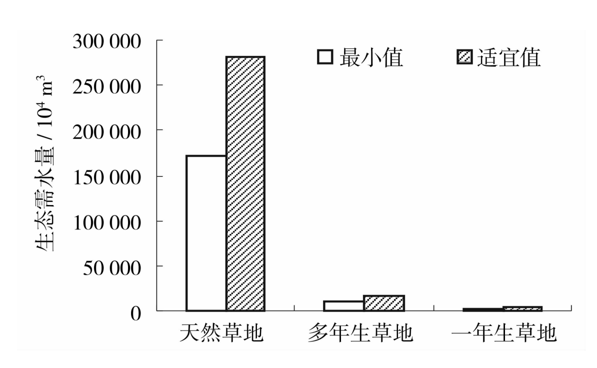


图 3 不同类别草地生态需水对比图

Fig. 3 Comparison of ecological water requirement for different categories of grassland

过对各类林草植被与降水资源的平衡分析，对植被分布面积提出合理化的建议。

4.2 各类林草植被生态需水与降水平衡的规律分析

林地及草地生态系统的需水可以通过天然降水得到补给，但由于降水和生态需水的时空差异，必然会有部分植被的生态需水量在某一特定时间段无法得到满足，从而使植被的生长受到一定程度的限制，因此我们将植被生态需水与天然降水对比后无法得到满足的那部分水量称之为生态亏缺水量；反之，在某一时段天然降水可能会大于植被生态需水量，对比后多余的降水量则称之为生态盈余水量。考虑到生态需水量适宜值和最小值有着基本相同的变化规律，同时也限于篇幅原因，在此仅讨论植被最小生态需水量的亏缺和盈余状态。由于降水及生态需水的时间变化规律上的差异，以及不同类型植被生态需水量微观及宏观上的差异，有必要对不同类型植被生态需水的盈亏状态逐月进行讨论。

具体估算方法如下。

$$H_i = A_i \times (E_{ci} - R_i) \quad (5)$$

式中：H_i 为 i 种植被的生态亏缺水量或生态盈余水量(10^4 m^3)；A_i 为 i 种植被的面积(km^2)；E_{ci} 为 i 种植被生长季的最小生态需水定额(mm)；R_i 为 i 种植被生长季的降雨量(mm)。

众多研究成果[8]认为在黄土高原地区，林地植被的耗水时段主要集中在生长季节 3 月到 11 月份。因此本研究根据各类植被的生态需水估算结果，采用公式(4)，逐月进行降水盈亏平衡计算，结果见表 5。表中正值表示生态盈余水量，负值表示生态亏缺水量。

由表 5 可见，3 月份除一年生草地以外，其它各类林地及草地均处于生态需水亏缺状态。其中林地中，亏缺水量最大的是灌木林地，其次是未成林地、有林地、疏林地、苗圃；草地中亏缺水量最大的是天然草地，其次为多年生人工草地，而一年生人工草地生态需水处于盈余状态，该月不需要人工补给水量，而其它各类林、草地如要达到更加理想的生存状态，在 3 月份均应考虑适当人工补给亏缺水量。3 月份对于位于西北地区的宁夏而言，蒸发并不十分强烈，植被生态需水量相对比较小，所以这个月份生态需水亏缺水量也较小。4 月份随着气温回暖、蒸发增强，降雨量又少，各类林地、草地生态需水亏缺量达到最大，就连一年生人工草地生态需水也处于亏缺状态，所以 4 月份尤其要注意植被生态需水的人工补给，其中以天然草地及灌木林地为最。5 月份尽管气温升高，林地的生态需水较大，但该月降雨量也有所增加，所以盐池县各类林草植被生态亏缺水量依然较大，但相比较 4 月有所降低，因此这个月份也要格外注意各类植被的缺水量的补充。6 月，随着降雨量的进一步增加以及生态需水的同步增加，盐池县各类植被生态需水依然处于亏缺状态，亏缺量大幅降低，尤其是一年生人工草地，生态需水已开始处于盈余状态。7月随着降雨量的进一步增加，各

表 5 盐池县各类植被降雨盈亏平衡分析 / 10^4 m^3

Tab. 5 Rainfall break-even analysis of each kind of vegetation / 10^4 m^3

植被种类	植被类型	3 月	4 月	5 月	6 月	7	8 月	9 月	10 月	11 月
林地	有林地	-83.80	-238.65	-83.02	-82.09	1 038.80	230.55	72.94	-70.75	-65.61
	疏林地	-16.55	-23.84	-11.72	-8.29	193.43	57.94	25.60	-6.36	-5.03
	灌木林地	-2 329.86	-2 785.00	-1 980.13	-1 671.92	16 863.11	4 536.15	1 819.31	-979.70	-685.30
	未成林地	-355.99	-651.07	-172.19	-56.70	6 666.66	2 121.20	981.71	-116.31	-113.99
	苗圃	-2.78	-3.33	-2.37	-2.00	20.15	5.42	2.17	-1.17	-0.82
草地	天然	-12 186.90	-13 977.40	-10 698.70	-9 265.55	77 503.15	19 990.18	7 674.73	-5 211.75	-3 560.32
	多年生	-737.34	-845.70	-647.30	-560.59	4 689.27	1 209.50	464.36	-315.33	-215.41
	一年生	5.62	-146.37	-93.27	138.96	2 735.70	958.47	473.31	25.02	-4.65

类林草植被生态需水都处于盈余状态,林地中生态需水盈余量最大的是灌木林地,其次是未成林地、有林地、疏林地、苗圃;草地盈余水量最大的是天然草地,其次为多年生人工草地和一年生人工草地; 7月各类植被生态需水盈余量达到全年最大。8、9月份随着降雨量的增加以及植被生态需水的逐步减小,各类植被的生态需水依然处于盈余状态,盈余量相比较7月份在逐步下降。10月随着气温降低,降雨量减小,各类植被生态需水又开始处于亏缺状态。11月随着降雨量的进一步减少,植被生态需水量也在降低,各类植被生态需水均处于亏缺状态,亏缺量相比较10月有所降低。通过以上盐池县植被降雨平衡的年内变化规律分析可知除7、8、9月以外,其它6个月中盐池县各类林草植被生态需水均处于亏缺状态,其中缺水量最为严重的是4月份,其次为3、5、6、10、11月;在生态需水盈余状态的7、8、9月份中,盈余量最大的是7月。并且通过比较7、8、9月份的生态需水盈余总量大于3、4、5、6、10、11月植被的生态需水亏缺总量。据此县域内应当采取合理可行的水资源调控措施,充分蓄存和利用盈余水量,在植被生态需水亏缺状态的月份采取一些人工干预措施对植被进行补水,以改善林地缺水状态,使其达到更好的水土保持效果。另外从植被类型上进一步分析,林地中无论是生态需水亏缺量还是盈余水量均以灌木林地为最,其次是无立木林地、有林地、疏林地;而草地中以天然草地为最,其次是多年生人工草地和一年生人工草地。众多研究已经证明尽管沙地可通过人工植被建设进行治理,但过大规模的人工植被建设可使沙地水分条件更加恶化,影响人工植被的稳定发展。因此,在干旱、半干旱区的沙地上,近自然地选择已对当地的生境形成了一种适应,并构成依其自身为主要树种构成的植被类型,并合理控制植被面积是十分重要的,这样才能够真正起到恢复生态环境的目的。

4.3 各生态分区生态需水特征分析

4.3.1 各生态分区生态需水比例分析 考虑到各生态分区土壤水分修正系数会有一定的差异,会对生态需水造成不同程度的影响,同时从生态建设及水资源管理方便性的角度考虑,非常有必要对各生态分区生态需水比例进行分析。由图4可知,盐池县一级生态分区中风沙区的生态需水比例远大于黄土丘陵区,其中风沙区需水比例为63%,黄土丘陵区的生态需水比例为37%。由图5可知二级生态分区中生态需水比例由大到小依次为花马池镇、王乐井乡、大水坑镇、高沙窝镇、惠安堡镇、冯记沟乡、青山乡、麻黄山乡,生态需水比例依次为22%、16%、16%、14%、13%、10%、5%、4%。

4.3.2 各生态分区生态需水特征分析 在生态需水研究领域,通常采用两个重要的特征值:生态需水系数和生态需水模数来对区域生态需水状况进行描述与分析,其计算公式为[1-2]:

$$C = Q_{jy} / P \times 100\% \tag{6}$$

$$M = Q_{xh} / A \tag{7}$$

式中:C 为生态需水系数(%);Q_{jy} 为降雨消耗性生态需水量(m^3);Q_{xh} 为消耗性生态需水量(m^3);P 为降水量(m^3);M 为生态需水模数($m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$);$A$ 为区域面积(km^2)。

通过公式(6)可知生态需水系数 C 表征的是降雨消耗性生态需水量与降水量之间的比值,是为了

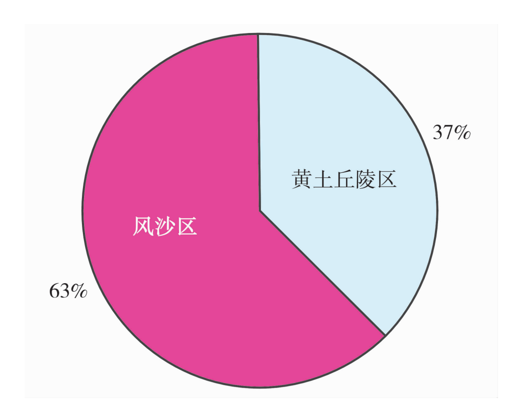


图4 一级生态分区生态需水比例图

Fig. 4 Proportion of ecological water requirement for first-level ecological zoning

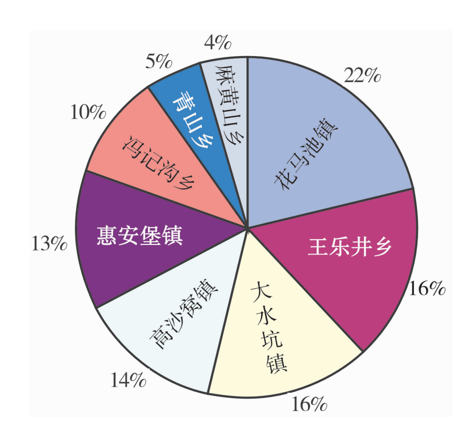


图5 二级生态分区生态需水比例图

Fig. 5 Proportion of ecological water requirement for second-level ecological zoning

表 6 盐池县一级生态分区生态需水特征值表

Tab. 6 Ecological water requiremen characteristics value for first-level ecological zoning

一级生态区	面积 / km^2	年均降水量 / 10^4 m^3	降雨消耗性生态需水量 / 10^4 m^3	消耗性生态需水量 / 10^4 m^3	生态需水系数 C_u / %	生态需水模数 M_u / 10^4 $m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$
黄土丘陵区	1 324	42 368.00	21 884.00	21 992.40	51.65	16.61
风沙区	5 296	156 761.00	87 538.85	91 969.70	56.05	17.36

反映一定流域或区域范围内年均降水有多少消耗于生态需水；而生态需水模数 M 则是指一定流域或区域范围内平均一年内每单位面积上的综合生态需水量。从表 6 可以看出，一级生态分区中，黄土丘陵区生态用水系数为 51.65%，风沙区为 56.05%；黄土丘陵区生态用水模数为 16.61 $m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$，风沙区为 17.36 $m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$。在这两项指标中，黄土丘陵区均小于风沙区。从表 7 可以看出，二级生态区中，花马池镇生态用水系数及生态用水模数最大，分别为 86.13%、26.17 $m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$，说明该区域降雨几乎全部转化为生态用水；其它乡镇这两项系数由大到小依次为王乐井乡、大水坑镇、惠安堡镇、高沙窝镇、青山乡、冯记沟乡，最小为麻黄山乡。各乡镇生态用水模数与生态用水系数相似，最大为花马池镇，最小为麻黄山乡。

4.4 降雨消耗性生态需水与盐池县水资源的关系

将区域降雨消耗性生态需水与区域水资源进行平衡分析，目的是为了明确区域内生态需水量、降水量与水资源之间的关系，进一步确定生态环境建设所需水量与水资源量之间关系。根据生态需水量的估算情况，设定两种情形来讨论降雨消耗性林地的水资源平衡问题，即最小与适宜状况。另外，根据之前的估算分析可知径流消耗性林、草地生态需水相对降雨消耗性生态需水所占比例极小，在此忽略其影响，仅对降雨消耗性生态需水与降水资源做平衡分析。现状生态需水量与以降水资源为基础的水资源平衡关系[1-2,10-14]可用下式来表达：

$$W_j + W_{入} = W_{出} + W_d + W_{zf} + \Delta W \quad (8)$$

式中：W_j 为区域年平均降水资源量(10^4 m^3)；W_d 为区域年平均径流量(10^4 m^3)；W_{zf} 为区域年平均蒸发量(10^4 m^3)；$W_{出}$、$W_{入}$ 分别为出入境水量(10^4 m^3)；各县区 $W_{出}$ 为 0；ΔW 区域多年平均蓄水量的变化量，对于多年平均而言，此项可忽略，即：$\Delta W=0$；将盐池县上述值带入公式后，得到年均水资源平衡结果，见表 8。

表中区域年均蒸发量 W_{zf} 包括县区境内的基本农田、降雨消耗性林、草地以及径流消耗性林、草地的蒸腾与蒸发、水域等各类蒸发量。从表 7 的估算结果可以看出盐池县降雨消耗性生态需水量最小值占蒸发总量的比例为 30.51%，适宜值占蒸发总量的比例为 72.91%，其余的蒸发量部分可能消耗于宜林地、非林地、荒地土壤蒸发、水域蒸发等的消耗，这部分消耗属于无效蒸发水量，仍然占有一定的比重，这依然为区域植被建设留有一定的空间，可以考虑通过进一步开发荒地、宜林地，适当增加林草植被面积、水土保持工程建设等措施可将无效蒸发的水量转化为消耗性生态用水，实现降水水资源的充分利用，并进一步改善生态环境。

表 7 盐池县二级生态分区生态需水特征值表

Tab. 7 Ecological water requiremen characteristics value for second-level ecological zoning

一级生态区	降雨消耗性生态需水量 / 10^4 m^3	消耗性生态需水量 / 10^4 m^3	生态需水系数 C_u / %	生态需水模数 M_u / 10^4 $m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$
花马池镇	20 383.69	21 917.33	86.13	26.17
高沙窝镇	13 691.41	14 530.71	50.23	18.80
王乐井乡	14 324.69	15 432.56	71.34	23.28
冯记沟乡	10 011.32	10 835.94	36.58	14.14
青山乡	11 294.75	12 546.47	40.87	15.67
惠安堡镇	12 192.63	12 593.32	52.94	19.82
大水坑镇	15 008.45	16 924.31	65.12	22.13
麻黄山乡	9 060.53	9 485.32	31.54	11.81

表 8 降水消耗性生态需水与水资源平衡关系表

Tab. 8 Balance between precipitation consumptive ecological water requirement and water resource

县区	生态需水等级	降雨消耗性生态需水量 / 10^4 m^3	年均降雨量 / 10^4 m^3	年均径流量 / 10^4 m^3	入境水量 / 10^4 m^3	年均蒸发量 / 10^4 m^3	降雨消耗性生态需水量占蒸发量的比例 / %
盐池县	最小值	47 069.23	158 380.18	4 070.00	0.00	154 310.00	30.50
	适宜值	109 423.56					72.91

5 结 论

(1) 当前盐池县草地的生态需水量远高于林地,可见草地是盐池县植被生态需水的主体,尤其是天然草地生态需水的占比非常之大;在三类林地生态需水中,灌木林地生态需水所占比例最大,其次是有林地和疏林地;草地中生态需水量由大到小依次为天然草地、多年生人工草地、一年生人工草地。究其原因造成各类植被生态需水差异的主要原因是各自分布面积的差异所引起的。

(2) 通过降雨平衡的时间变化规律分析可知,除 7、8、9 月以外,盐池县各类林草植被生态需水均处于严重亏缺状态,其中缺水量最为严重的是 4 月,其次为 3、5、6、10、11 月;在生态需水盈余状态的 7、8、9 月中,盈余量最大的是 7 月份。根据以上分析盐池县可以在林地生态需水亏缺状态的月份采取一些人工措施对植被进行补水,以改善林地缺水状态,使其达到更好的水土保持效果;另外从植被类型上进一步分析,可知林地中无论是生态需水亏缺量还是盈余水量均以灌木林地为最大,其次是无立木林地、有林地、疏林地;而草地中以天然草地为最,其次是多年生人工草地和一年生人工草地。

(3) 盐池县一级生态分区中,风沙区的生态需水比例远大于黄土丘陵区;二级生态分区生态需水比例由大到小依次为花马池镇、王乐井乡、大水坑镇、高沙窝镇、惠安堡镇、冯记沟乡、青山乡、麻黄山乡。通过对各生态分区生态需水特征的分析可知,一级生态分区中风沙区的生态需水系数及生态需水模数稍大于黄土丘陵区;二级各生态分区中由大到小依次为花马池镇、王乐井乡、大水坑镇、惠安堡镇、高沙窝镇、青山乡、冯记沟乡,最小为麻黄山乡。

(4) 盐池县降雨消耗性生态需水量最小值占蒸发总量的比例为 30.51%,适宜值占蒸发总量的比例为 72.91%,其余的蒸发量部分可能消耗于宜林地、非林地、荒地土壤蒸发、水域蒸发等的消耗,这部分消耗属于无效蒸发水量,仍然占有较大的比重,这依然为区域植被建设留有一定的空间,可以考虑通过进一步开发荒地、宜林地,适当增加林草植被面积、水土保持工程建设等措施可将无效蒸发的水量转化为消耗性生态用水,实现降水水资源的充分利用,并进一步改善生态环境。

参考文献(References)

[1] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报,2002,11(9):14-19. [NI Jinren, CUI Shubin, LI Tianhong, et al. On water demand of river ecosystem[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,11(9):14-19.]

[2] 沈国舫. 生态环境建设与水资源的保护和利用[J]. 中国水土保持,2001,23(1):4-7. [SHEN Guofang. Eco-enviroment construction and water resource protection and utilization[J]. Soil and Water Conservation in China,2001,23(1):4-7.]

[3] 高凯. 吉林西部生态环境需水量研究[D]. 长春:吉林大学,2008. [GAO Kai. Study on ecological environment water demand in western region in Jilin Province[D]. Changchun:Jilin University,2008.]

[4] 储蓓,尚松浩. 河谷林草需水量与耗水量计算方法及其应用[C]//变化环境下的水资源响应与可持续利用——中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集,2009:479-482. [CHU Bei, SHANG Songhao. The calculation method and application of water consumption in river valley[C]// Water resources response and sustainable utilization in a changing environment:Proceedings of academic conference on water resources committee of the China Water Conservancy Association in,2009:479-482.]

[5] 何永涛,李文华,李贵才,等. 黄土高原地区森林植被生态需水研究[J]. 环境科学,2004,25(3):35-39. [HE Yongtao, LI Wenhua, LI Guicai, et al. Study on ecological water demand for forest vegetation in Loess Plateau[J]. Environmental Science,2004,25(3):35-39.]

[6] 李金燕. 宁夏中南部干旱区林草植被生态需水变化研究[J]. 人民黄河,2016,38(12):116-122. [LI Jinyan. Variation characteristics of ecological water requirement research about forest and grass in the central and southern Ningxia[J]. Yellow River,2016,38(12):116-122.]

[7] 李金燕,张维江. 宁夏固原城乡饮水水源工程受水区林地生态环境需水量研究[J]. 湖北农业科学,2014,53(1):63-67. [LI Jinyan, ZHANG Weijiang. Eco-environmental water demand research of woodland in reception basin of urban and rural drinking water source engineering of Guyuan, Ningxia[J]. Hubei Agricultural Science,2014,53(1):63-67.]

[8] 李金燕,张维江. 宁夏中南部干旱区域林草植被生态需水研究[J]. 水土保持通报,2014,34(2):276-280. [LI Jinyan, ZHANG Weijiang. Ecological water demand research about forest and grass in the central and southern Ningxia[J]. Water and Soil Conservation Bulletin,2014,34(2):276-280.]

[9] JENSEN 著,马文译. 耗水量与灌溉需水量[M]. 北京:农业出版社,1982. [JENSEN, translated by MA Wen. Water consumption and irrigation water demand[M]. Beijing: Agricultural Press,1982.]

[10] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林地土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-184. [WANG Mengben, LI Hongjian. Quantitative study on soil moisture dynamics of artificial woodland in the yellow soil area of northwest Shanxi[J]. Ecological Journal,1995,15(2):178-184.]

[11] 郭巧玲,杨云松,李建林,等. 额济纳绿洲生态需水及其预测研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,5(5):135－139. [GUO Qiaoling,YANG Yunsong,LI Jianlin,et al. Study on ecological water demand and prediction of Ejina oasis[J]. Resources and Environment of Arid Area,2011,5(5):135－139.]

[12] 孙栋元,胡想全,金彦兆,等. 疏勒河中游绿洲天然植被生态需水量估算与预测研究[J]. 干旱区地理,2016,39(1):154－162. [SUN Dongyuan,HU Xiangquan,JIN Yanzhao,et al. Study on the estimation and prediction of ecological water demand on natural vegetation in middle reaches of Shule River[J]. Arid Land Geography,2016,39(1):154－162.]

[13] 周丹,沈彦俊,陈亚宁,等. 西北干旱区荒漠植被生态需水量估算[J]. 生态学杂志,2015,34(3):670－680. [ZHOU Dan,SHEN Yanjun,CHEN Yaning,et al. Estimation of ecological water demand for desert vegetation in the northwest arid region[J]. Journal of Ecology,2015,34(3):670－680.]

[14] 白元,徐海量,凌红波,等. 塔里木河干流区天然植被的空间分布及生态需水[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1410－1417. [BAI Yuan,XU Hailiang,LING Hongbo,et al. Spatial distribution and ecological water demand of natural vegetation in Tarim River trunk stream[J]. Journal of Desert Research,2014,34(5):1410－1417.]

Characteristics of vegetation ecological water demand in Yanchi County in the arid area of Central Ningxia

LI Jin-yan[1,2,3]

(1 *School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*; 2 *Engineering Technique Research Center for Water Saving Irrigation and Water Resources in Ningxia, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*; 3 *Engineering Research Center for Efficient Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Regions, Yinchuan* 750021, *Ningxia, China*)

Abstract: The paper chose Yanchi County which is located in the arid area of central Ningxia Province, China, as the research object. The connotation and classification of ecological water requirement are analyzed firstly. Then the regional vegetation potential evaporation and ecological water requirement were estimated from month to month using the Penman-Monteith model. The soil moisture correction coefficient was determined using the Jensen formula combined with the measured regional soil characteristics curve at last. Through the proportion analysis of different types of ecological water requirement from vegetation, it showed that the current existing grassland ecological water requirement was far higher than that of woodland. For the three kinds of forest ecological water requirement, shrub land proportion was the largest, and the descending order list of grassland ecological water requirement from large to small was as follows: natural grassland, perennial artificial grassland, and annual artificial grassland. Secondly the temporal variation of balance law between rainfall and ecological water requirement for vegetation was analyzed, and it showed that the ecological water requirement from each kind of existing vegetation was in serious deficit except in the months of July, August and September with the situation in April being the worst. It also showed that whether there is water deficit or water surplus in terms of meeting ecological water requirement from the woodland, the shrub land was outstanding, and from the grass land, the natural grass land was outstanding. The analysis of ecological water requirement characteristics based on ecological zoning indicated that the proportion of ecological water requirement from the windy and sandy area was much greater than that in loess hilly region in the primary ecological division. For the secondary ecological division, the list in descending order based on the proportion of ecological water requirement from big to small was as follows: Huamachi town, Wanglejing town, Dashuikeng town, Gaoshawo town, Hui'anpu town, Fengjigou town and Qingshan town. The minimum value of existing rainfall consumptive ecological water requirement accounted for 30.51% of total evaporation and the suitable value accounted for 72.91% of total evaporation. The proportion was high and the rest of the evaporation part may be consumed in non-forest land soil evaporation, which belongs to ineffective evaporation of water consumption yet occupies a large proportion.

Key words: Yanchi County of Ningxia; proportion of ecological water requirement of vegetation; balance between rainfall resource and ecological water requirement; ecological water requirement